

工业物联网（IIoT）在超硬材料生产监控中的集成应用

王雷

杭州市蒂慕超硬材料有限公司，浙江杭州，310000；

摘要：随着制造业迈入智能化时代，工业物联网（IIoT）技术正成为推动新型材料制造升级的关键手段。超硬材料作为高端制造中的重要基础材料，其生产过程具有高能耗、高精度、高风险等特征，对监控系统的实时性、精准性和数据整合能力提出了更高要求。本文聚焦工业物联网在超硬材料生产监控中的集成应用，探讨其在数据采集与边缘计算、设备互联与智能监测、以及质量控制与故障预警方面的实施路径。通过分析 IIoT 架构与关键技术，结合实际工艺流程和工业现场案例，构建智能感知、动态优化、协同运维的一体化系统模型，为提升超硬材料生产的稳定性、良品率与安全性提供技术支撑。

关键词：工业物联网；超硬材料；生产监控；数据采集；质量控制；智能制造

DOI：10.69979/3041-0673.25.10.055

1 智能感知系统在超硬材料生产中的构建

1.1 多维传感网络的部署策略

超硬材料在进行合成的时候，往往是处于高温高压以及高能量密度这样极为特殊的极端环境当中的。像温度、压力、碳源浓度、电流强度等这些关键的工艺参数，它们要是出现波动的情况，那么就很有可能会对晶体结构以及材料性能产生直接的影响。所以说呢，去布置那种有着高可靠性并且抗干扰能力比较强的多维传感网络，这已经变成智能监控方面首要需要去落实的一个环节了。在高温合成炉里面，把红外温度传感器和光纤布拉格光栅传感器配合着来使用，如此一来，不但能够达成非接触式的监测效果，而且还拥有很不错的抗电磁干扰的能力。而在高压反应釜的周边，则是去设置压阻型应变片以及电容式压力传感器，通过这样的设置就可以实现对成形压力展开动态的感知操作。在粉体制备车间这里，运用激光粒径分析仪还有在线图像识别系统去对粉末分布状态加以识别，以此来确保材料前驱体能够保持一致性。

1.2 边缘计算节点的数据处理机制

当面临多源异构传感器所产生的海量实时数据之时，运用边缘计算架构能够切实减轻云平台所承受的压力，同时达成局部的智能判断这一目标。边缘节点是以嵌入式处理器作为核心部分的，它把本地数据库以及轻量化 AI 模型整合到一起，以此来完成对原始数据展开的初步处理工作以及针对异常情况所做的判断事宜。就好比说，系统能够凭借机器学习算法针对压力波动的趋势构建起相应的模型，一旦察觉到存在高于阈值的非线性突变情况，那么便可以在本地即刻触发报警信号，而且还会通过 5G 网络同步传至中央调度平台，进而实现

那种‘先有所感知，随后再做出响应’的时效机制。除此之外，边缘节点相互之间是能够形成 P2P 互联模式的，如此一来，便可以在多个生产单元之间达成信息共享以及联动控制的效果。

1.3 智能终端与人机交互界面的优化

要提升操作者在操作时的便利程度以及系统的响应效率，那就有必要构建一个以移动终端作为载体的智能交互平台。系统借助 HTML5 或者 Flutter 框架来开发轻量化的 APP，这个 APP 拥有实时数据查询的功能，能够进行预警推送，还可以完成参数设置等相关操作。工人能够利用平板或者智能眼镜实时去查看炉体内部的温度分布图，也能够在远程对合成曲线加以调节。与此同时，语音识别技术也在逐渐融入到操作界面当中，工人凭借口头指令就可以调用设备状态报表，以此来提升人机交互过程中的流畅程度以及精准程度，进而减少因为误操作而引发的安全隐患。

2 设备互联与过程控制的系统集成

2.1 生产设备的异构接入技术

超硬材料的生产流程极为复杂且连贯，它包含了从对粉体展开预处理，一直到实行高温高压合成，再到后续开展机械精整等诸多阶段，其间牵涉到多种多样的工业设备。这些设备来源各有不同，制造年代也不一样，其控制系统更是五花八门，从传统的 PLC、DCS，到现代以以太网为依托的智能终端等等，存在着颇为严重的信息孤岛难题。所以说，让这些异构设备达成互联互通，属于 IIoT 系统集成方面的关键技术难点其中之一。要解决这一问题的话，可以去构建一个统一的数据通信中间层，把 OPC UA（统一架构对象链接与嵌套）当作核心

标准，进而设计出具有高兼容性的通信桥接模块。

通过将带有 OPC UA 接口的设备直接与数据总线进行对接，而针对那些采用传统串口通信或者不具备开放协议的设备，则运用工业采集网关、信号转接板或者嵌入式数据转换模块，对它们的状态信号予以封装并且开展标准化的处理，最终使其映射到统一的信息模型当中。在这个过程里，还得借助数字孪生技术来为每台设备打造出‘虚拟镜像’，将设备当下的运行状态、过往的工况数据、维护记录等所有情况全都以可视化的方式呈现出来，由此形成高度契合的数字主线。基于此，系统便能够实现诸如生产计划下达、远程参数设定、状态监控以及故障溯源等一系列功能，这样不但打通了设备层彼此间的信息通道，而且还为后续的过程优化以及智能调度筑牢了相当坚实的数据根基。

2.2 过程控制中的自适应调节策略

超硬材料的质量把控在很大程度上取决于合成环节里温度、压力、电流、电场等各项参数所具备的稳定性以及精度情况。特别是在压坯与烧结这两个阶段的时候，哪怕是出现极其微小的偏差，都极有可能致使晶粒在发育过程中出现异常状况，或者是在材料内部产生缺陷。

当把 IIoT 系统引入进来之后，相关企业便有能力达成依据实时所获取的数据来开展自适应的闭环式控制，进而打破传统那种‘设定值—执行—反馈—人工调整’所呈现出来的低效循环模式。该系统会将通过传感器网络所采集到的诸如温度、位移、振动等一系列关键工艺参数当作输入内容，然后把模糊控制逻辑与工艺知识库相互结合起来去构建相应的控制模型，以此来给诸如热电偶、红外加热器、伺服压头等各类控制元件下达最为理想的执行指令。

2.3 能源管理与设备状态监测的协同实现

在高温高压这样特定的环境之下，去合成超硬材料的时候，其所需要耗费的能源往往会在整个制造成本当中占据颇为显著的一个比例。如此一来，设法提升能源方面的利用效率，让设备的使用寿命得以延长，同时减少那些并非按计划安排而出现的停机时间，这已然成为 IIoT 系统在该相关领域所具备的核心价值当中的一个重要方面。凭借分布式的能源监控模块，系统能够针对所有的生产单元，对其电压、电流、频率以及功率因数等各类参数展开实时的采集工作，并且还可以做相应的趋势分析。依靠 AI 模型来构建起各类设备的典型负载曲线之后，系统便能够自动去判别其运行状态是不是偏离了经济运行的区间。就好比说，要是发现某一电感加热设备长时间都是处在低负荷运行的这么一种状态下，

系统就会相应地生成调整方面的建议，提示是否要把负载进行合并，或者切换到节能的模式，又或者启用能量回馈系统等操作，以此来最大程度地降低能源被浪费的情况出现。

同一时间里，IIoT 平台把设备状态监测模块整合了起来，针对像加热丝、油泵、压模结构、真空泵等这些关键部件，在其运行期间，对振动情况、温升状况以及润滑状态等展开不间断地跟踪。借助残余寿命预测算法，RUL 模型去评估这些部件的使用极限，进而生成相应的维修计划。要是冷却系统里的泵体，其工作温度一点点地往上攀升，慢慢接近以往出现过失效情况时的温度阈值了，那么系统就会提前两周给出维护方面的提醒，并且还会给出更换备件的合适时机方面的建议，这样就能防止因为临时抢修而造成的停产情况出现，也能避免由此带来的效率方面的损失。另外，能耗数据以及状态数据，会在同一个平台上以可视化的方式展示出来，这就方便管理者去制定能源管理以及设备维保方面的相关政策，推动绿色制造以及全生命周期管理能够切切实实地全面落实下去。

3 质量追溯与故障预警的智能支撑

3.1 产品质量全过程追溯系统建设

在超硬材料的生产环节里，产品质量能不能实现可追溯，这可不单单和企业内部的质量管理水平紧密相关，更是企业获取客户信赖以及顺利通过像航空、精密医疗这类高端制造行业认证的重要因素。以往那种依靠传统纸质记录或者孤立系统记录的方式，如今已经没办法妥善处理当下复杂且多变的工艺流程以及多批次交叉作业所引发的管理方面的难题了。通过借助 IIoT 技术，企业能够针对每一批超硬材料产品打造出独一无二的数字身份标识，也就是 UID。

这个 UID 从产品刚刚开始生成的时候，就会和产品所使用的原料批次、加工时的各项参数、设备实际的运行状态、工艺环境相关的数据等各类信息紧紧地绑定在一起，并且在整个生产以及质检的全过程当中持续不断地积攒起它的“数字档案”。就拿从粉末配料这个环节，系统能够实时对原材料的进货来源以及纯度检测报告进行记录；在烧结这个过程当中，系统会自动抓取合成炉的温度变化曲线、电流的变动情况以及压力方面的数据；到了检测环节的时候，又会把显微结构的图像、硬度测试得出的结果等自动归到 UID 数据库当中。

要保证数据具备完整性且无法被篡改，那就引入区块链技术吧，用它来做加密存储，同时开展多节点共识验证。如此一来，数据的安全性得以增强，而且还为跨部门以及跨企业去共享信息开拓出了可信的通道。在实

际的应用场景里，要是某一批次的产品在客户使用过程中出现了性能方面的偏差，工程师借助 UID 就能够迅速地回溯到具体的工艺节点，甚至能查到责任班组，连设备序列号也能知晓，进而可以精准地定位出潜在问题的源头，并且能够快速做出响应。这种管理方式，整个过程都是可视的，也能够进行追溯，还可以接受审计，这就极大地提升了企业管控质量的能力，也为企业的获取更多高端市场准入机会增添了助力。

3.2 异常检测与预警模型构建

在超硬材料的实际生产环节当中，哪怕是极其微小的工艺方面的波动情况，都很有可能会给晶粒结构带来影响，对内应力的分布状况也会产生作用，甚至还会对终端的力学性能造成那种不可逆的影响。所以呢，异常检测以及风险预警这样的机制，已然成为了 IIoT 平台所具备的核心功能当中的一个重要部分。和传统的那种主要依靠人工经验来进行判断的方式比起来，现代的 IIoT 系统是凭借深度学习还有大数据建模这些技术手段，能够在整个数据链条范围之内构建起维度比较高、耦合性较强的预测模型，以此来针对复杂的工艺状态展开动态化的监控操作，并且实现对其的智能识别。

烧结环节系统能够凭借历史方面的大数据来对 LSTM（也就是长短期记忆神经网络）模型展开训练，针对温度的具体分布状况、热梯度所发生的变化情况以及电流产生的波动情形和烧结时间之间存在的关系来构建相应的模型，进而对未来好几分钟之内热场是不是有可能出现局部过热又或者是分布不均等这类现象加以预测。要是在实际的生产数据方面出现了和模型输出结果有着明显偏离的情况（比如局部升温的速度过快、热场保持稳定的时间不够等），那么系统便会自动地触发红色预警，借助工业通讯协议实时地推送至负责工艺的主管以及调度平台那里，并且同时启动设备的自保程序，像是降低电源所承载的负载、延长保温的时长或者启用备用的设备等方式来降低可能存在的风险。

3.3 质量改进的数据驱动决策支持

在过去的超硬材料生产环节当中，质量方面的优化工作常常要依靠工程师长时间积累下来的经验，并且还得经过反复不断地试验才行。这种主要由经验来起主导作用，而数据却相对滞后的生产模式，其效率是比较低下的，而且还特别容易受到人为主观因素的影响。企业借助工业物联网（IIoT）平台持续不断积累下来的全流程数据方面的资产，就能够去构建起专门面向工艺质量改进的智能决策系统，进而实现从依靠经验来驱动向凭借数据来驱动的这种根本性的转变。该系统会对数量多

达数以千计的生产批次数据展开清洗、使其标准化以及进行建模分析等一系列操作，如此一来，它便可以运用像 Apriori 算法这样的关联规则挖掘手段，自动地把那些会致使产品硬度出现下降情况、使得晶体结构变得不稳定或者引发表面存在缺陷的多因子组合给提取出来。

在研究过程中发现，当特定的温度升速曲线与某一类炉型相互搭配的时候，更容易出现空心颗粒的情况。与此同时，若是识别出粉体的粒径大于 30 微米，那么成品密度波动增大这一趋势也会显现出来。进一步来讲，系统能够凭借 K-means 或者 DBSCAN 聚类算法，把所有的历史数据划分成多个‘质量表现簇’，进而去分析在这些数据当中，究竟是哪些参数组合更加接近于高合格率的产品，以此来指导当下批次的生产优化工作。系统会在后台自动生成一份‘工艺优化试验计划书’，并且会建议工程人员对配料比例做出调整、对温控策略进行修改或者对模具类型予以更换，而且还可以调用内置的仿真模块，针对新策略的可行性以及潜在风险提前开展评估工作。在这整个过程当中，所有的优化行为都会被详细记录下来，并且能够实现回溯，从而为企业构建持续改进的知识图谱给予有力的支持。最终，决策流程达成了从‘分析-反馈-试验-优化-闭环’这样一种智能演进的状态，不但使得工艺改进的周期得以缩短，而且还在很大程度上提升了良品率、稳定性以及技术积累方面的效能。

4 结语

工业物联网作为新一代信息技术与制造业深度融合的产物，正日益重塑超硬材料产业的生产监控体系。从智能感知到协同控制，从设备互联到质量追溯，IIoT 技术不仅提升了工艺稳定性与安全水平，更促进了制造效率与资源利用率的同步优化。未来，随着 5G、AI、数字孪生等技术的进一步发展，其与超硬材料生产的深度融合将愈发紧密。企业应加快转型步伐，构建以数据为核心的智能制造体系，全面实现向高端化、绿色化、智能化的跃升。

参考文献

- [1] 许辰人, 刘启瑞, 刘謙哲. 实物互联网中的感知一体化关键技术、挑战与发展建议 [J/OL]. 中国科学基金, 1-14 [2025-05-10].
- [2] 应臻昶. 基于物联网的智能燃气仪表在工业节能中的应用与优化 [J]. 中国仪器仪表, 2025, (04): 41-44.
- [3] 王航宇, 吕飞, 程裕亮, 等. 工业物联网零信任安全研究综述 [J/OL]. 计算机研究与发展, 1-23.